

PATRONES DE LA VEGETACIÓN Y SU RELACIÓN CON VESTIGIOS ARQUEOLÓGICOS ASOCIADOS AL BENEFICIO DE COBRE EN LA LOCALIDAD DE JICALÁN VIEJO, MICHOACÁN*

VEGETATION PATTERNS AND THEIR RELATIONSHIP WITH ARCHAEOLOGICAL VESTIGES ASSOCIATED WITH THE BENEFIT OF COPPER IN THE LOCALITY OF JICALÁN VIEJO, MICHOACÁN

Verónica Osuna-Vallejo**
Iriani Ramos Velázquez**
Roberto Antonio Lindig-Cisneros***
Juan Julio Morales Contreras****
José Luis Punzo-Díaz*****

Fecha de recepción: 09 de junio de 2020 • Fecha de aprobación: 17 de septiembre de 2021.

Resumen: El principal objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto que tiene la actividad minera en los patrones de la vegetación durante un periodo específico, ya que en el occidente de México las actividades mineras tienen una larga historia que se remonta a la época precolombina. Como consecuencia de esta actividad, pueden encontrarse varios tipos de vestigios, desde minas abandonadas y depósitos de residuos, hasta escorias

* Agradecemos a la DGAPA-UNAM por el financiamiento, a través del proyecto PAPIIT IN 116218, al INAH-Michoacán y al Consejo de Arqueología por los permisos y facilidades otorgados. A Hans Roskamp y a los revisores anónimos por la detallada lectura del texto y sus valiosas sugerencias.

** Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) —campus Morelia—, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), México.

*** Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) —campus Morelia—, Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad (IIES), México, rlindig@cieco.unam.mx.

**** Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) —campus Morelia—, Instituto de Geofísica Unidad Michoacán (IGUM), México, jmorales@tonatiuh.igeofcu.unam.mx.

***** Instituto Nacional de Antropología e Historia —centro INAH Michoacán—, México, jose_punzo@inah.gob.mx.

del proceso de fundición (querendas) y depósitos de jales. Sin embargo, aunque existen abundantes evidencias culturales de actividades relacionadas con la minería (precolombianas, coloniales y contemporáneas), el daño ambiental causado por ellas no ha sido cuantificado, en especial, los efectos en el suelo y la vegetación a largo plazo. Por otra parte, la presentación de esta metodología de estudio nos permite, en arqueología, valorar áreas de actividad metalúrgica mediante el análisis del estado y grado de contaminación presente en la vegetación.

Palabras clave: arqueometalurgia; arqueometría; contaminación; arqueología tarasca; Michoacán.

Abstract: The main objective of the present study was to evaluate the impact of mining activity on vegetation patterns in a specific period, since mining and smelting activities in western Mexico have a long history dating back to pre-Columbian times. Because of this activity, many types of remains can be found, from abandoned mines and waste deposits, to slag from the smelting process (*querendas*) and tailings deposits. However, although there is abundant cultural evidence of mining-related activities (pre-Columbian, colonial, and contemporary), the environmental damage caused by them has not been quantified, especially the effects on the soil and vegetation in the long term. On the other hand, the presentation of this methodological study allows us in archeology to assess areas of metallurgical activity through the state and degree of contamination present in the vegetation.

Keywords: archaeometallurgy; archaeometry; contamination; Tarascan archaeology; Michoacán.

Résumé : L'objectif principal de la présente étude était d'évaluer l'impact de l'activité minière sur les modèles de végétation au cours d'une période spécifique, étant donné sa longue histoire remontant à l'époque précolombienne dans l'ouest du Mexique. À l'issue de cette activité, de nombreux types de restes peuvent être trouvés, des mines abandonnées ainsi que des dépôts de déchets aux scories provenant du processus de fusion (*querendas*) et des dépôts de résidus. Cependant, bien qu'il existe de nombreuses preuves culturelles d'activités liées à l'exploitation minière (précolombiennes, coloniales et contemporaines), leurs dommages environnementaux n'ont pas été quantifiés, en particulier les effets sur le sol et la végétation à long terme. D'autre part, la présentation de cette méthodologie d'étude en archéologie nous permet d'évaluer les zones d'activité métallurgique à travers l'état et le degré de contamination présents dans la végétation.

Mots-clés : Archéométaballurgie ; archéométrie ; contamination ; archéologie tarasque ; Michoacán.

Introducción

Uno de los retos de países como México, donde los vestigios arqueológicos son abundantes a lo largo y ancho de su territorio, es la preservación y conservación de los mismos ante la realidad de contar con recursos limitados para su exploración y protección. Solo en el estado de Michoacán —por ilustrar con la región en la que se enmarca este estudio—, se sabe que hay más de 2000 sitios arqueológicos, de los cuales solo seis se encuentran abiertos al público. Por ello, uno de los retos de la arqueología en este tipo de contextos es conocer con más detalle las características de los sitios arqueológicos registrados, pero aún no explorados, con técnicas que resulten económicas y no impliquen la excavación u otro tipo de intervención de los vestigios arqueológicos, que los expondrían a los elementos y harían más vulnerables al saqueo.

El uso de diferencias en la vegetación, ya sea natural o de cultivos, ha permitido desde hace tiempo identificar la ubicación de vestigios arqueológicos enterrados. En el caso de los cultivos, puede ocurrir que los vestigios permitan una mayor acumulación de materia orgánica, nutrientes o agua, en cuyo caso se generan *marcas positivas* donde las plantas presentan un mejor aspecto y una coloración más oscura cuando se desarrollan sobre el vestigio. Lo contrario también puede ocurrir cuando los vestigios tienen un efecto negativo y generan *marcas negativas* (Dassié 1978; Wilson 1982). En la actualidad, la interpretación de imágenes de satélite, visualmente o por medio de análisis espectral, es una herramienta útil para este propósito (Lasaponara y Masini 2006; Merola et al. 2006).

En el occidente de México, principalmente en el territorio que hoy corresponde al estado de Michoacán, se estableció el imperio tarasco. Los tarascos dominaron las técnicas de extracción y beneficio del cobre, con el cual elaboraron diversas aleaciones (Gavira Márquez 2009). A partir de la llegada de los españoles, la explotación de las minas de metales preciosos, como el oro y la plata, quedó gradualmente en sus manos, mientras que la de metales menos cotizados, como el cobre, fue dejada a los indígenas de la región, quienes se vieron obligados a pagar una cuota de lo extraído en las minas a los encomenderos de la Corona; valga mencionar, además, que los españoles recién llegados, al parecer, no tenían las capacidades para fundir correctamente el cobre (García Zaldúa 2019). En el caso particular de este metal, aumentó su demanda por parte de la Corona española y comenzó a utilizarse para acuñar monedas, amalgamar plata, producir armas durante los varios conflictos bélicos españoles y, más tarde, confeccionar los cascos de los navíos. Sin embargo, pese a su creciente demanda, el desarrollo de técnicas

y tecnología para mejorar su extracción y fundición fue escaso (Uribe Salas 1993; Gavira Márquez 2009).

A lo largo del territorio mexicano, se han identificado algunos sitios de extracción y fundición de cobre. El poblado de Jicalán Viejo, en el sur de Michoacán, es un sitio representativo de esto, pues su tradición del manejo de dicho metal data de antes de la llegada de los españoles y se mantiene posteriormente, lo que revela que el sitio ha sido expuesto a este manejo durante un tiempo acotado. Además, en él se pueden apreciar distintos y sutiles cambios tecnológicos en el proceso de fundición del cobre. El mineral empleado en este poblado, probablemente, fue extraído en mayor medida de las minas de Inguarán, unas de las más grandes durante la época precolombina y la Colonia (Uribe Salas 1993; Hosler 2005), que se encuentran a unos sesenta kilómetros en línea recta hacia el sureste, en las montañas de Tierra Caliente de Michoacán.

Se sabe que en las minas de Inguarán existían yacimientos de calcopirita, calcocita y arsenopirita, lo que, junto con los datos de la relación de Sinagua, sugiere que pudo haberse producido cobre y bronce de cobre-arsénico. En el caso de Jicalán, se usó principalmente calcopirita (Roskamp et al. 2005), un mineral al que se le puede extraer hasta un 34 % de cobre (Vasallo Morales 2008). Sin embargo, investigaciones recientes sugieren que anteriormente al uso de este mineral tal vez se extraían carbonatos a los que se les podía extraer el metal de forma menos complicada.

El proceso de extracción y fundición del mineral y las menas fue rudimentario y poco cambió durante su historia de explotación. De manera muy sintética, podemos mencionar que, durante la fundición, el metal se calienta hasta fundirse; mientras se enfría, los componentes de esta masa semilíquida empiezan a reagruparse de acuerdo con su peso, lo que permite al metal separarse del resto de la escoria. Una vez enfriado, se rompe la escoria para separarla del metal. Esta escoria, separada y en pedazos —denominada en Michoacán con la palabra purépecha *querenda*—, se acumula en grandes cantidades en los sitios de beneficio de cobre.

Una de las consecuencias del beneficio de metales es la contaminación local del suelo y, si las condiciones de este lo permiten, su movilización en el paisaje y a través de las redes tróficas, incluyendo al ser humano. La vegetación muestra los efectos tóxicos de la presencia de metales pesados en el suelo de diversas maneras y es una consecuencia del daño celular y metabólico que causan. En el caso del maíz, cultivo que se planta y consume en el poblado de Jicalán Viejo, se sabe que es acumulador de cobre y arsénico (Ruiz Huerta y Armienta Hernández 2012), lo que puede generar su entrada a la cadena trófica y daños a la salud humana.

Dada la larga historia de ocupación humana y, particularmente, en el estado de Michoacán, de la práctica de la metalurgia, existen sitios arqueológicos como Jicalán Viejo aún no completamente explorados, donde puede ponerse a prueba la utilidad del uso de la vegetación como indicador de la presencia de vestigios. Adicionalmente, por medio de técnicas de análisis de elementos químicos presentes en las plantas, puede explorarse la utilidad de la bioacumulación como indicador de la posible ubicación en el terreno de los sitios donde se llevó a cabo esta actividad.

Jicalán Viejo: Un asentamiento metalúrgico prehispánico y colonial temprano

La primera mención histórica sobre el asentamiento de Jicalán o Xiuhqulan aparece en el reporte escrito por Antonio de Carvajal, en 1524 (Warren 1977), en el cual se refiere a este con el nombre de Chicaya (Roskamp 2001; Roskamp y Rétiz García 2011), poblado sujeto a Uruapan que se encontraba a cuatro leguas de este y contaba, en ese entonces, con sesenta casas y estaba gobernado por un calpixque de nombre Quarasco.

Cabe destacar que el documento más temprano que hace referencia a la explotación de minas de cobre —el reporte levantado por Vasco de Quiroga, en Michoacán, a encomenderos españoles, caciques y fundidores indígenas, en 1533 (Warren 1968)— no menciona a Jicalán de ninguna forma.

La primera referencia importante a la producción de lingotes de cobre en Jicalán aparece hasta 1548-1550, en el documento de la Suma de Visitas de Pueblos de la Nueva España, donde se dice que el poblado tiene 43 casas y viven en él 131 personas. El documento menciona que el pueblo de Jicalán tenía que dar al encomendero de Uruapan, Francisco Villegas (García Castro 2013), cada ochenta días, seis cargas pequeñas de cobre, mantas, manteles y pañuelos. Dichas cargas, suman veinticuatro cargas por año, que dan un total aproximado de novecientos cincuenta kilogramos (García Zaldúa 2019). Esta producción de cobre reportada en el documento es muy importante, ya que nos da una idea del trabajo metalúrgico en ese lugar a mediados del siglo xvi, pero nos plantea, primeramente, la problemática de que en los alrededores del poblado no se encuentran minas de cobre; estas se ubican a cerca de sesenta kilómetros de distancia, por lo que debieron existir importantes rutas de traslado del mineral hasta este lugar para poder realizar la fundición primaria del metal.

En 1565, los indios de Jicalán presentan una queja contra los indios de Urecho, en la ciudad de Pátzcuaro, por la explotación de un cerro donde se encuentran minas o bancos de matiz, que los primeros usaban para hacer pigmentos con los que coloreaban jícaras. A lo largo de este pleito, que ha sido ampliamente trabajado por Hans Roskamp (2001), sale a colación la presencia de minas de cobre en la región de Tierra Caliente. De hecho, el centro de la defensa legal de los indios de Urecho se basa en que las minas eran, desde tiempos prehispánicos, propiedad del cazonci de Tzintzuntzan, cuestión que podemos rastrear, por ejemplo, en el documento de 1533 de Vasco de Quiroga. Finalmente, la justicia de Pátzcuaro otorga a los indios de Jicalán derechos para continuar haciendo uso de las minas en litigio.

Posiblemente asociado a ese proceso legal, existe el llamado anteriormente *Lienzo de Jucutácato* y hoy conocido como *Lienzo de Jicalán* (Roskamp 2001; Roskamp y Rétiz García 2011), una de las pinturas indígenas más reconocidas en Michoacán. El lienzo se encuentra dividido en treinta y ocho recuadros que están conectados por una línea de color, con glosas tanto en náhuatl como en purépecha. Siguiendo la interpretación de Roskamp, se trata de un relato de los xihquilteca, la gente de Xihquilan, que va desde su creación divina, saliendo de un *chalchiuhtlahpazco* (recipiente de piedras preciosas), guiados por sus dios patrono Tezcatlipoca —representado en forma de ave con un disco sobre la cabeza—, y después de pasar por distintos lugares reconocibles del centro de México, hasta su llegada al territorio del actual Michoacán, por el norte, para, finalmente, fundar el cacicazgo de Xihquilan, bajo el liderazgo de Nauatzin. Si bien no podemos tener un certero cómputo del tiempo acerca de cuándo pudo haber pasado esta migración o incluso si fue un hecho histórico, es posible ver que se trata de un grupo que clama una identidad étnica nahua y que se asentó en el lugar antes de la conquista del imperio tarasco (dada en la región unos cien años antes de la llegada de los españoles), lo que es muy relevante.

Otro punto fundamental sobre el lienzo es que, en el recuadro correspondiente a Xihquilan, se pueden apreciar, de manera clara, personas que se encuentran fundiendo objetos de metal como coas o azadas y hachas, junto a unos fundidores que soplan a través de cañas hacia un horno abierto móvil. Además, se observan otros individuos sentados que, al parecer, pintan jícaras.

El tercer punto principal del lienzo es que muestra tres rutas a distintos lugares de Tierra Caliente en Michoacán; la primera hacia el río Balsas, pasando por algunos de los lugares con minas más importantes que se explotaron en la época prehispánica, como Inguarán (Guaraxo), Churumuco y Cocian; en los

recuadros de Tepulan, Xantsiquiyo (no identificados) y Churumuco puede verse a los xihquilteca explotando minas, cuestión que se remarca en algunas de las glosas. La segunda ruta, al parecer, es una más corta y va, posiblemente, sobre el río Cupatitzio hasta algún punto en la actual presa Infiernillo, donde se localizan algunas minas. Finalmente, la tercera ruta se encuentra sobre el río de Tepalcatepec; en ella no se nota ninguna mina, aunque, como menciona Roskamp (2001), los daños de los últimos cuadros de esta ruta pueden haber borrado las probables evidencias de que sí encontraron minerales en los lugares correspondientes.

El cuarto punto fundamental del lienzo es otra ruta que va hacia la ciudad de Tzintzuntzan o Ihuatzio —de Mechuacan—, para rendir tributo a uno de los señores uacusecha, que gobernaban el señorío tarasco. Este recuadro es muy importante porque los xihquilteca ofrendaban objetos metálicos, al parecer hachas y azuelas (*coas* en nahua o *tareguas* en purépecha), además de jícaras.

Este breve recuento nos permite entender algunos aspectos centrales sobre el pueblo metalurgista de Jicalán. En primer lugar, podemos afirmar que existió una tradición de trabajo del metal desde la época prehispánica, en sus dos fases fundamentales: la fundición primaria, es decir, desde la obtención de la mena hasta su transformación en lingotes metálicos, y, posteriormente, la fundición secundaria, que es la transformación de los lingotes en objetos como hachas y azuelas. Esto nos permite pensar que, como se aprecia en el lienzo, el proceso minero se realizó en lugares que se hallaban, al menos, a entre cincuenta y ochenta kilómetros de distancia, donde, mediante estos documentos y recorridos arqueológicos, hemos podido localizar minas de cobre con posibles explotaciones prehispánicas, en el área de Inguarán, Cocian y Churumuco (Punzo Díaz et al. 2019). Esto implica que, probablemente, el proceso de selección de la mena se hiciera en estas minas y, tal vez, también un primer proceso de fundición (Warren 1968), que luego se trasladaba a poblados como Jicalán para su refinamiento.

Otra cuestión muy relevante es que el proceso de trabajo metalúrgico, al parecer, no fue interrumpido por la irrupción hispana, sino que, como se ha visto para otros lugares (Punzo Díaz, Morales y Goguitchaichvili 2015; Morales et al. 2017; García Zaldúa, Sebastián y Hosler 2020), fue continuo y, por lo visto, los españoles usaron el conocimiento de los indígenas sobre la fundición de metales en su propio beneficio, aunque con el aporte de nuevas tecnologías y herramientas. Finalmente, cabe destacar que Jicalán fue un poblado que se relocalizó, en 1609, diez kilómetros al norte, en las cercanías de Uruapan, por lo que sabemos que los restos arqueológicos corresponden a un periodo restringido al final de la época prehispánica y principios de la colonial.

Materiales y métodos

Área de estudio

Jicalán Viejo es un ejido ubicado en el municipio de Uruapan, Michoacán (véase fig. 1), con una altura media de 1075 m s. n. m. Se localiza en el Eje Neovolcánico, en la región hidrológica del Balsas, en la subcuenca del Cupatitzio (CIGA 2014). Se caracteriza por tener un suelo de tipo vertisol, un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, una temperatura media anual de 25 °C, una precipitación media anual de 800 mm y seis meses de suelos húmedos.

La vegetación dominante en Jicalán es el pastizal; en las periferias de la zona hay vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino-encino al norte, de selva baja caducifolia al sur y sureste, y de bosque de encino al este y oeste.

En la zona arqueológica descrita, que fue localizada desde los años ochenta del siglo xx y luego trabajada a principios del siglo xxi (Grinberg 1997; Roskamp et al. 2005; Roskamp y Rétiz García 2011), se encuentra un talud artificial de 74 m

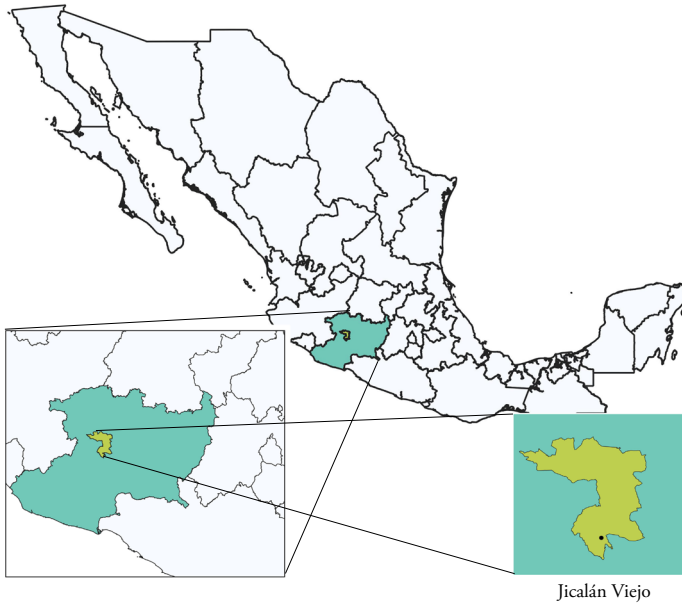


Figura 1. Ubicación del sitio arqueológico de Jicalán Viejo en el municipio de Uruapan, en el estado de Michoacán, México.

de largo, una yácata (montículo piramidal), abundante material tanto lítico como cerámico y los restos de diversas construcciones, incluyendo una capilla del siglo xvi (véase fig. 2a). Ese talud en específico resalta porque se encuentra directamente asociado a grandes concentraciones de escoria de la producción de cobre. Por medio de los estudios arqueológicos se ha podido comenzar a vislumbrar cómo fueron los procesos de fundición en este sitio. En primer lugar, es importante destacar que en las partes donde se han localizado concentraciones de escoria, también se han hallado fragmentos de mena de cobre, posiblemente, de sulfuros de cobre. Mediante el estudio de la escoria del sitio, se ha podido determinar que esta es el resultado del procesamiento de calcopirita y que se realizó en hornos muy eficientes (Grinberg 1997; Roskamp et al. 2005; Roskamp y Rétiz García 2011; Maldonado 2006, 2008). Estos estudios son fundamentales, ya que nos permiten corroborar que en el sitio de Jicalán se llevó a cabo la fundición primaria de las menas de cobre trasladadas desde las minas hasta allí. Asimismo, que llevar a cabo estas tareas implicó la trituración del mineral de cobre, posiblemente calcopiritas, en mesas fijas y morteros móviles de roca para hacer concentrados, lo que debió dejar importantes residuos en las áreas de trabajo; no sabemos aún si el proceso de refinamiento de los concentrados se hacía de manera manual, en seco o en húmedo, mediante flotación, pero sí sabemos que este importante proceso era realizado, especialmente, por niños y mujeres en la época prehispánica (Warren 1968). Igualmente, cabe mencionar que, una vez obtenido el concentrado, se procede por medios pirometalúrgicos a su transformación en metal, mediante distintos procesos, que van dando como desechos las escorias (querendas) —de diferentes tipos según la parte del proceso—, las cuales se acumulan, generalmente, en áreas destinadas a esto, en lugares cercanos a los hornos de fundición.

En la actualidad, en el sitio de estudio se siembra, principalmente, maíz, sin embargo, este cultivo suele intercalarse con calabaza y frijol. En el área, también puede observarse vegetación arbórea nativa, como árboles de parota (*Enterolobium cyclocarpum*) y arbustos del género *Acacia*, principalmente.

Para esta siembra, la comunidad emplea la técnica de rotación de cultivos, que consiste en dejar el terreno sin sembrar durante varios años y utilizarlo durante cinco años antes de volverlo a dejar “reposar/descansar”; asimismo, se sabe que la comunidad no emplea ningún tipo de fertilizante o agroquímico, por lo que se descarta la presencia de cobre como consecuencia de las actividades agrícolas (comunicación personal con los miembros de la comunidad de Jicalán Viejo).

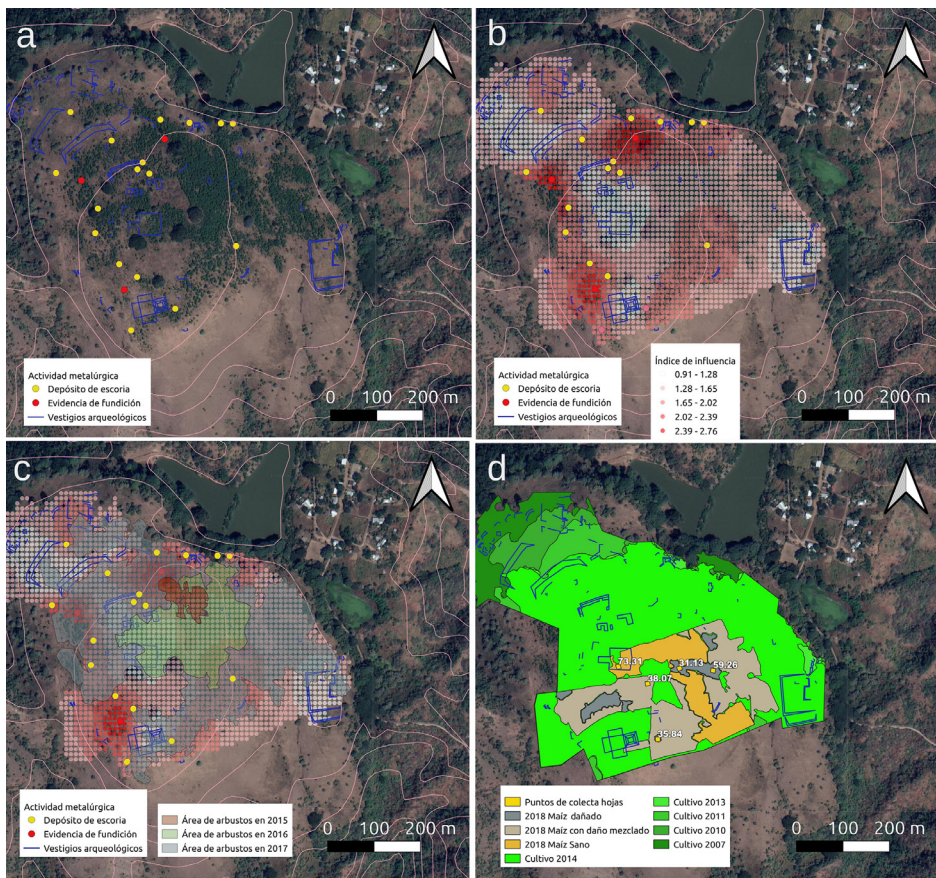


Figura 2. Cambio en el área cultivada, en la zona arqueológica de Jicalán Viejo, a lo largo de los años.

Muestreo en campo y análisis de imágenes

Se analizaron las imágenes de la zona de estudio disponibles en Google Earth®, que comprenden los años 2007 a 2014. Se delimitaron dos tipos de polígonos, los que corresponden a la zona cultivada en cada año y los que corresponden a la cobertura de los arbustos nativos de la zona. De esta manera, se determinó la relación entre el área de cultivo y la expansión de los arbustos, en función de los vestigios arqueológicos reconocidos y el tipo de los mismos (áreas de fundición, depósitos de querenda y vestigios constructivos).

Por otro lado, en 2018, dentro del área cultivada ese año, se determinó el estado general del maíz en el mes de agosto y se clasificó en cuatro categorías (véase tabla 1). A una distancia vertical de 100 m sobre la superficie, con un dron (DJI Phantom 3), se tomaron fotografías aéreas que se unieron para formar tres ortofotografías que muestran el área cultivada del sitio de estudio en los años 2018, 2019 y 2020.

Tabla 1. Categorías para describir el estado del maíz cultivado en 2018

<i>Categoría</i>	<i>Descripción</i>
1	Plantas sanas, presentan alturas considerables y sus hojas son color verde.
2	Plantas con alturas menores a las observadas en la categoría 1, con color verde.
3	Plantas altas, con color amarillo.
4	Plantas con altura media y con hojas con coloración amarilla.

A partir de la clasificación de las plantas individuales, se definieron zonas de estado general del cultivo del maíz como se describen a continuación:

- Maíz sano (MS): Maíz color verde oscuro, con hojas largas y anchas, con una altura superior a los dos metros.
- Maíz con daño mezclado (MM): En la imagen se alcanzan a apreciar individuos con una coloración que va de verde a amarilla, acompañados de manchones donde el maíz parece no crecer o crecer poco; esto se puede observar mediante las sombras que proyectan los individuos de maíz.
- Maíz dañado (MD): Se alcanzan a distinguir claros manchones amarillos en la imagen; en ella, se encuentran ampliamente representados individuos enfermos. En estas áreas, el maíz llega a dejar manchones de vegetación descubiertos, ya que no es capaz de establecerse, desarrollarse o crecer.

Influencia de las actividades humanas, interpolación

Para establecer la relación entre los vestigios arqueológicos identificados en Jicalán y el estado de la vegetación, se generó un mapa de interpolación que clasifica los vestigios en función de la influencia que pueden tener en el desarrollo de las plantas. Se consideró que los vestigios constructivos pueden generar marcas positivas o negativas de baja intensidad (se les asignó un valor de 1); los depósitos de escorias, por tratarse de material vítreo, marcas negativas de intensidad

intermedia (se les asignó un valor de 2); y los sitios con evidencia de fundición, una marca negativa intensa (se les asignó un valor de 3). Con esta clasificación se elaboró un modelo de interpolación, por medio del paquete GSTAT (Pebesma 2004) de R. Se determinó el mejor ajuste para el semivariograma, que coincidió con un modelo esférico y se interpoló por medio de Kriging simple. Los gráficos se elaboraron con QGIS 3.8.1.

Cuantificación de cobre en maíz

En el área cultivada, en 2018, se categorizó el estado de las plantas de maíz usando cuatro categorías (véase tabla 1), para elaborar un mapa del estado del cultivo. Además, se tomaron muestras de hojas de maíz, para cuantificar cobre, de la siguiente manera: en cinco sitios se tomó la sexta hoja de tres individuos diferentes, contando con muestras de individuos que correspondían a cada una de las categorías de daño (véase fig. 3). Las muestras se llevaron al laboratorio, ahí se secaron por 48 h, a 60 °C, en un horno de secado, hasta alcanzar peso constante, se molieron y se prepararon pastillas, utilizando una prensa hidráulica (Specac modelo GS15011), para su análisis, por medio de la técnica de fluorescencia de rayos X para la determinación de cobre.

Se tomaron todas las precauciones posibles para minimizar la posibilidad de contaminación entre muestras; estas incluyeron la limpieza meticulosa de todos los equipos de molienda y homogeneización con aire comprimido, agua destilada y metanol para eliminar cualquier resto de muestra previamente tratada. Se mezclaron 3 g del polvo obtenido con 0.5 g de cera en polvo (Hoechst wax-c micro powder) utilizando un mortero de ágata. La mezcla fue depositada en dado para prensado de una pulgada de diámetro y presionada hasta 10 ton. La prensa se dejó relajar durante un minuto y, a continuación, la presión se incrementó de nuevo a 10 ton. Finalmente, la presión fue liberada y la pastilla preparada se retiró del dado.

Las muestras se analizaron utilizando un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersiva (FRX-ED) Xenometrix's X-Calibur, equipado con tubo de rayos X de 50 kV, filamento de Rh y detector de deriva de silicio (SDD) con ventana amplia de berilio, en las instalaciones del Laboratorio Universitario de Geofísica Ambiental (LUGA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

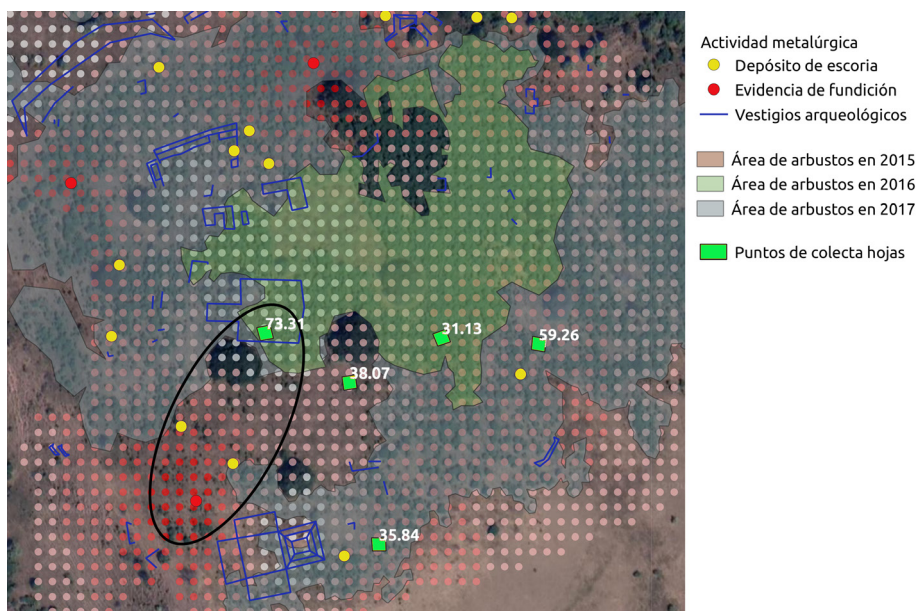


Figura 3. La elipse marca la zona donde hay más evidencia de trabajo de fundición de cobre y el punto donde se colectó la muestra de hojas de maíz que presentó la mayor concentración de cobre.

El material de referencia interno IGLs-1 —muestra de suelo laterítico de un conjunto de ocho nuevos materiales de referencia geoquímicos (Lozano y Bernal 2005)— se utilizó con fines de control y se midió sistemáticamente después de cada siete muestras analizadas. Se utilizó un tiempo de integración de 60 s para todas las determinaciones.

La curva de calibración para cobre (Cu) que se utilizó fue obtenida empleando los materiales de referencia geoquímicos de la serie IGL (Lozano y Bernal 2005): IGLa-1 (17 $\mu\text{g/g}$), IGLD-1 (4 $\mu\text{g/g}$) e IGLs-1 (58 $\mu\text{g/g}$); andesita, dolomía y suelo laterítico, respectivamente.

A fin de determinar los posibles efectos de matriz, se implementó el método de calibración con adición conocida o adición de estándar, el cual consiste en añadir cantidades conocidas del analito en *solvente puro* y medir la respuesta instrumental en una serie de adiciones crecientes. En este punto, vale la pena hacer notar la extraordinariamente baja cantidad de material disponible por muestra (5 g) para los análisis. Debido a esto, se utilizó como solvente puro un pulverizado de hojas de maíz tratadas de forma similar a las hojas muestreadas en campo.

Resultados

Cambios en el área cultivada a través de los años e interpolación de la influencia de los vestigios arqueológicos

De acuerdo con las imágenes disponibles de Google Earth® y las conversaciones con los campesinos, el polígono de la zona arqueológica fue cultivado durante los años 2007, 2010, 2011, 2013, 2014 y, finalmente, el año 2018, en el que se hicieron las visitas de campo. A lo largo de los años, la superficie cultivada fue disminuyendo; desde el máximo, en 2007, con 25.7 ha, hasta 7.4 ha en 2018 (véase fig. 2d). Esta disminución se debe a que el área de vestigios, hacia el norte del polígono, se fue dejando de cultivar para limitar el cultivo a la zona sur (véase fig. 2). En la figura 2 puede observarse que, particularmente para 2018, los cultivos se limitan a un área con relativamente pocos puntos de vestigios relacionados con el trabajo del beneficio del cobre.

El resultado del análisis de interpolación (véase fig. 2b) para la influencia de los vestigios arqueológicos en el terreno indica que el área cultivada en 2018 corresponde a la de mayor extensión con influencia baja o media de los vestigios arqueológicos, solamente alterada por un punto correspondiente a un depósito de escorias al centro.

Desarrollo de la vegetación arbustiva

De acuerdo con la interpretación de las imágenes disponibles, entre 2015 y 2017, los arbustos nativos mostraron una expansión considerable en el sitio (véase fig. 2c). Esta expansión comenzó en un área pequeña, de aproximadamente 4 ha, que alcanzó 15 ha tres años después. El patrón de expansión muestra que, a partir del área inicial, se fueron cubriendo zonas con influencia baja y media de los vestigios arqueológicos, solo para cubrirse áreas con influencia alta hasta el tercer año.

Se puede apreciar la expansión —diferencia de la cobertura de los arbustos— en función del número de puntos de interpolación de cada categoría de nivel de influencia cubiertos en cada año (véase fig. 4). En 2015, el área inicial de expansión, que se encontraba cerca de uno de los puntos de fundición, tenía el 65 % de los puntos cubiertos por arbustos (con un valor de influencia de 1.8 o menor); al año siguiente (2016), el 91 % y en 2017, el 74 %.

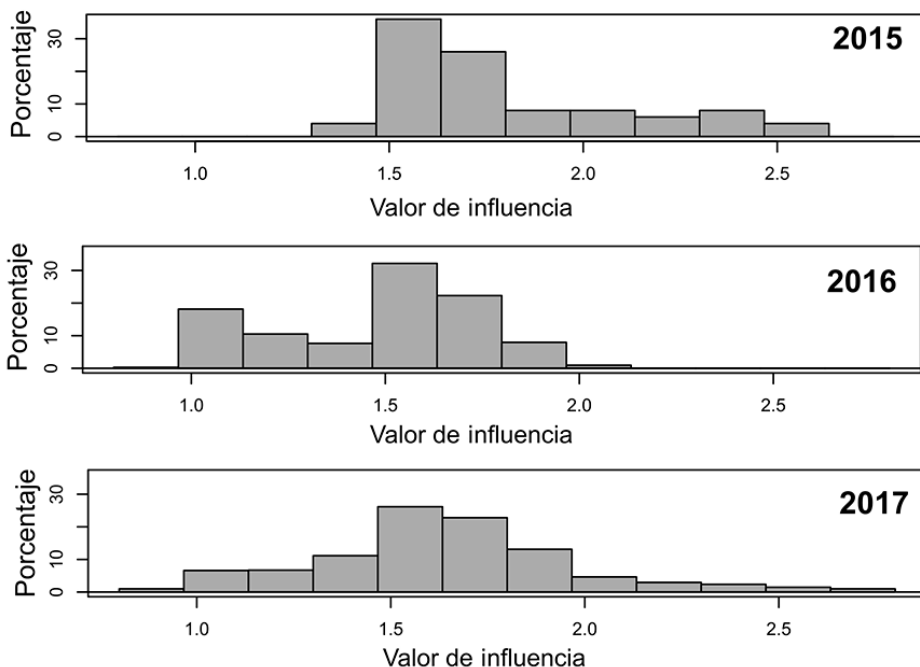


Figura 4. Histogramas del número de puntos de interpolación por categoría de valor de influencia cubiertos por arbustos, en los tres años en los que se evaluó su expansión.

Cultivo de maíz en 2018 y contenido de cobre

El área cultivada en 2018 mostró considerable heterogeneidad en cuanto al estado de las plantas de maíz. Las áreas con plantas de maíz en buen estado son casi tan extensas como las áreas con maíz dañado o mezclado, en cuanto a su estado de desarrollo. Los análisis de cobre en las muestras de hojas de maíz arrojaron valores que van desde las 31 $\mu\text{g/g}$ hasta las 73 $\mu\text{g/g}$ (véase fig. 2d). De las muestras, la de mayor concentración corresponde a un área con la mayoría de las plantas en buen estado y que, de acuerdo con el modelo de interpolación, es de baja influencia de vestigios arqueológicos. Este punto se encuentra a unos pocos metros de los restos de la capilla, y los arbustos tampoco llegaron a desarrollarse en él (véase fig. 3). El segundo punto con una concentración alta, 59 $\mu\text{g/g}$, es el que se encuentra más al este, en un área con plantas de maíz, en

general dañadas, y de influencia media de vestigios; de acuerdo con el modelo de interpolación, las otras tres muestras presentaron valores de 31, 35 y 38 $\mu\text{g/g}$, respectivamente.

Discusión y resultados

Los resultados del presente estudio muestran que los vestigios arqueológicos en Jicalán, en su mayoría enterrados, tienen un efecto diferencial, de acuerdo con su origen, sobre la presencia y salud de las especies vegetales, tanto de las naturales (vegetación arbustiva) como de las plantas sembradas, especialmente el maíz. El desarrollo de la masa arbustiva y su expansión se relaciona con la influencia de los vestigios enterrados, en particular en los dos primeros años, en los que la mayor parte del área corresponde a puntos con influencia baja o media de vestigios arqueológicos.

El abandono de la parte norte del sitio arqueológico para el cultivo se relaciona con la mayor densidad de vestigios asociados al beneficio del cobre, tanto de escorias como de los dos puntos de fundición, que fueron identificados durante los recorridos de superficie. En el caso de la parte sur de la zona arqueológica, el patrón que muestran las plantas de maíz cultivadas en 2018 también se relaciona con las zonas de intensidad de la influencia humana, que arroja el modelo de interpolación.

En cuanto a los análisis de cobre en hojas de maíz, es relevante que la concentración fue elevada y varió entre 31 y 73 $\mu\text{g/g}$. En un estudio realizado con cinco cultivos, incluyendo el maíz, se encontró que concentraciones mayores a 11 $\mu\text{g/g}$ de cobre en las hojas corresponden al punto de inflexión en donde se comienza a detectar un efecto tóxico en la planta, el cual se manifiesta, principalmente, con un menor crecimiento y acumulación de biomasa. De acuerdo con los modelos ajustados a las curvas de respuesta en el mismo estudio, una concentración de 11 $\mu\text{g/g}$ en el tejido se logra con valores superiores a 40 $\mu\text{g/g}$ de cobre en el suelo (Fageria 2001). Las concentraciones de este elemento en el suelo, para lograr concentraciones de 30 $\mu\text{g/g}$ en la planta, serían mayores a 100 $\mu\text{g/g}$.

De acuerdo con los valores umbrales para el Cu en suelos agrícolas (Aguilar Ruiz et al. 1999), valores < 50 $\mu\text{g/g}$ son considerados como *nivel de referencia*; valores entre 50 y 150 $\mu\text{g/g}$, como *nivel de investigación recomendable*, y valores entre 150 y 300 $\mu\text{g/g}$, como *nivel de investigación obligatoria*; mientras que por arriba de los 300 $\mu\text{g/g}$ son considerados como *nivel de intervención*.

Es importante mencionar que hay una anomalía en los datos y corresponde a la muestra de hojas de maíz que presentó la mayor concentración de cobre, pues se encuentra a unos pocos metros de la capilla, lo que, en la clasificación de influencia de los vestigios en la vegetación, corresponde a un área de baja influencia, por lo que es posible que en este punto se encuentren vestigios, no identificados aún, relacionados con el beneficio de este metal, como podría ser un horno de fundición o áreas de molido y trituración de la mena, que debieron de dejar grandes cantidades de residuos de cobre. Es de destacar que, en esa área aledaña al atrio de la capilla, hay una abundancia alta de vestigios de lítica pulida, como manos de metate y metates o ticuiches que pudieron haber servido para actividades de molienda y preparación de la mena.

Es así que el modelo aquí presentado —que integra tres componentes: el estudio arqueológico de los vestigios muebles e inmuebles detectables en la superficie, la observación de los patrones de crecimiento y salud de las comunidades vegetales, y el análisis elemental de muestras de la vegetación— nos ha permitido, por una parte, contar con una mejor descripción del sitio arqueológico, sin llevar a cabo una intervención, y por otra, hacer un modelo predictivo sobre la presencia de áreas de actividad metalúrgica en el sitio arqueológico, lo que permitiría priorizar el trabajo de exploración una vez que se cuente con autorización y recursos. Este tipo de estudio transdisciplinar nos da la oportunidad de adentrarnos, de un modo más certero, a las actividades desarrolladas por los antiguos habitantes de estos lugares. De igual manera, este estudio presentó un resultado muy importante: pese a que en este lugar se dejaron de hacer tareas ligadas a la fundición y manejo de minerales de cobre desde hace cuatrocientos años, la presencia de sus residuos continúa en el suelo y estos son absorbidos por las plantas, en este caso el maíz, dando valores de presencia sumamente altos en las hojas, lo que nos muestra la permanencia de estos contaminantes, producto del trabajo minero.

Referencias

Aguilar Ruiz, José, Carlos F. Dorronsoro Fernández, José Luis Gómez y Emilio Galán Huertos. 1999. «Los criterios y estándares para declarar un suelo como contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestra y análisis para su investigación». En *Investigación y desarrollo medioambiental en Andalucía: Resultados del Acuerdo Marco suscrito entre la Consejería de Medio Ambiente y la Universidad de Sevilla (1995-1998)*, 61-64. Sevilla: Universidad de Sevilla / Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación.

- CIGA (Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental). 2014. *Programa de Monitoreo Comunitario de Calidad del Agua Bajo Balsas (Michoacán, México). Contexto hidrográfico en la cuenca del Río Balsas*. México: Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Facultad de Biología de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Grupo Balsas, Fundación Gonzalo Río Arronte IAP, Gobierno del Estado de Michoacán, Consejo Estatal de Ciencia, Tecnología e Innovación de Michoacán y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
- Dassié, Jacques. 1978. *Manuel d'archéologie aérienne*. París: Editions Technip.
- Fageria, N. K. 2001. «Adequate and toxic levels of copper and manganese in upland rice, common bean, corn, soybean, and wheat grown on an oxisol». *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32 (9): 1659-76. doi:10.1081/CSS-100104220.
- García Castro, René, ed. 2013. *Suma de visitas de pueblos de la Nueva España, 1548-1550*. Toluca: Universidad Autónoma del Estado de México.
- García Zaldúa, Johan Sebastian. 2019. «When worlds collide: European-Indigenous copper production during the contact and early Colonial Period of Michoacán, Mexico (1521-1607)» (tesis doctoral, University of Kent / Universidade do Porto). <https://kar.kent.ac.uk/74402/>.
- García Zaldúa, Johan Sebastian y Dorothy Hosler. 2020. «Copper smelting at the archaeological site of El Manchón, Guerrero: From indigenous practice to colonial-scale production». *Latin American Antiquity* 31 (3): 558-75. doi:10.1017/laq.2019.105.
- Gavira Márquez, María Concepción. 2009. «Tecnología para fundir y refinar el cobre en Michoacán (Nueva España): La fábrica de Santa Clara del Cobre a fines del siglo XVIII». *Cuadernos de Historia*, 31: 7-26. <https://cuadernosdehistoria.uchile.cl/index.php/CDH/article/view/30814/32560>.
- Grinberg, Dora M. K. 1997. «El Lienzo de Jucutácato y el Legajo 1204, Ramo Indiferente General del Archivo General de Indias». En *Códices y Documentos sobre México: Segundo Simposio*, editado por Salvador Rueda-Smithers, Constanza Vega y Rodrigo Martínez Baracs, 381-96. México: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Hosler, Dorothy. 2005. *Los sonidos y colores del poder: La tecnología metalúrgica sagrada del occidente de México*. Zinacantepec: El Colegio Mexiquense A. C.
- Lasaponara, Rosa, y Nicola Masini. 2006. «Identification of archaeological buried remains based on the normalized difference vegetation index (NDVI) from Quickbird satellite data». *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 3 (3): 325-28. doi:10.1109/LGRS.2006.871747.
- Lozano, Rufino, y Juan Pablo Bernal. 2005. «Characterization of a new set of eight geochemical reference materials for XRF major and trace element analysis». *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 22 (3): 329-44.
- Maldonado, Blanca Estela. 2006. «Preindustrial copper production at the archaeological zone of Itziparátzico, a tarascan location in Michoacán, Mexico» (tesis doctoral, The Pennsylvania State University). <https://etda.libraries.psu.edu/catalog/7242>.
- _____. 2008. «A tentative model of the organization of copper production in the Tarascan state». *Ancient Mesoamerica* 19 (2): 283-97. doi:10.1017/S0956536108000400.

- Merola, Pasquale, A. Allegrini, D. Guglietta y S. Sampieri. 2006. «Study of buried archaeological sites using Vegetation Indices». *Proceedings*, 6366. doi:10.1117/12.689727.
- Morales, Juan, María del Sol Hernández-Bernal, Avto Goguitchaichvili y José Luis Punzo Díaz. 2017. «An integrated magnetic, geochemical and archeointensity investigation of casting debris from ancient metallurgical sites of Michoacán, Western Mesoamerica». *Studia Geophysica Geodaetica* 61 (2): 209-309. doi:10.1007/s11200-016-1033-z.
- Pebesma, Edzer J. 2004. «Multivariable geostatistics in S: the gstat package». *Computers & Geosciences* 30 (7): 683-91. doi:10.1016/j.cageo.2004.03.012.
- Punzo Díaz, José Luis, Juan Morales y Avto Goguitchaichvili. 2015. «Evidencia de escorias de cobre prehispánicas en el área de Santa Clara del Cobre, Michoacán, Occidente de Mesoamérica». *Arqueología Iberoamericana*, 28: 46-51.
- Punzo Díaz, José Luis, Max Edwin Ayala, Marcelo Ibarra, Alejandro Valdes Herrera y Fernanda Navarro. 2019. *Proyecto arqueología y paisaje del área Centro Sur de Michoacán: Informe técnico parcial 2019*. Archivo Técnico del Consejo de Arqueología. Morelia, Michoacán: Instituto Nacional de Antropología e Historia.
- Roskamp, Hans. 2001. «Historia, mito y legitimación: El Lienzo de Jicalán». En *La Tierra Caliente de Michoacán*, editado por José Eduardo Zárate Hernández, 119-52. Zamora, Michoacán: Colegio de Michoacán / Gobierno del Estado Michoacán.
- Roskamp, Hans, Mario Rétiz, Anyul Cuéllar y Efraín Cárdenas. 2005. *La metalurgia prehispánica y colonial en Jicalán, Michoacán, México: Una prospección arqueológica*. Foundation for the Advancement of Mesoamerican Studies, Inc. <http://www.famsi.org/reports/02011es/02011esRoskamp01.pdf>.
- Roskamp, Hans, y Mario Alfredo Rétiz García. 2011. «Jicalán el Viejo, Michoacán: Una prospección arqueológica e histórica (resultados de la primera fase)». En *Raíces culturales en la historia de la Tierra Caliente Michoacana*, editado por José Arturo Oliveros Morales, 167-206. Zamora: El Colegio de Michoacán.
- Ruiz Huerta, Esther Aurora, y María Aurora Armienta Hernández. 2012. «Acumulación de arsénico y metales pesados en maíz en suelos cercanos a jales o residuos mineros». *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* 28 (2): 103-17.
- Uribe Salas, José Alfredo. 1993. «La explotación del cobre en la Nueva España». *Ciencia Nicolaita*, 4: 45-60.
- Vasallo Morales, Luis Fernando. 2008. *Yacimientos minerales metálicos*. 4.^a edición. Querétaro: Centro de Geociencias / Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.academia.edu/5237915/Yacimientos_Minerales_Metalicos.
- Warren, Benedict J. 1968. «Minas de cobre de Michoacán, 1533». *Anales del Museo Michoacano*, 2.^a época, 6: 35-52.
- . 1977. *La conquista de Michoacán, 1521-1530*. Estudios Michoacanos 6. Morelia: Fimax. <https://www.colmich.edu.mx/relaciones25/files/revistas/001/BenedictWarren.pdf>.
- Wilson, David Raoul. 1982. *Air photo interpretation for archaeologists*. Londres: St. Martin's Press.